

天宫二号空间实验室科学研究综述

摘要：本文系统梳理天宫二号空间实验室上的主要科研项目及其进展，对比分析天宫二号与国际空间站等平台开展的相关科研项目，深入剖析我国空间实验室的科研水平、优势与差距，并就我国后续载人航天空间应用任务的开展提出几点思考和建议。

一、引言

2016年9月15日，我国第一个真正意义上的空间实验室——天宫二号成功发射。天宫二号身负两大使命：一是空间科学与应用研究，即在轨开展较大规模的空间科学实验和应用试验；二是载人空间站关键技术验证，即进行航天员中期驻留、在轨推进剂补加和在轨维修维护等关键技术验证。

天宫二号空间实验室上安排了基础物理、空间天文、微重力流体物理、空间材料科学、空间生命科学和地球观测及应用等多个学科领域的前沿科学与应用研究项目。天宫二号成功发射入轨以后，应用载荷按照计划完成了初步的功能测试，开展了空间科学实验、地球观测和应用新技术实验，各个有效载荷和在轨支持设备工作正常，性能稳定，状态良好，获取了较为丰富的科学实验数据和应用数据，取得了初步的应用成果。

天宫二号空间实验室及其开展的科研项目受到国外学术界和媒体的广泛关注和高度评价。国际知名学术杂志《自然》的评论中

称，中国已经成为颇具吸引力的国际空间合作伙伴，国外科学家对于来中国开展空间科学研究充满兴趣，认为中国既有资源，又有发展意愿，相比于美国和欧洲航天机构，项目推进速度快得多。同时，天宫二号空间实验室及其科研项目展现了中国的科技自主创新能力。美国《时代》周刊将天宫二号评为 2016 年度世界 25 项最佳发明之一。天宫二号绝非天宫一号的简单升级版本，它装备了全新配套的空间应用系统的科学设备，无论是数量还是安装复杂程度，都创造了历次载人航天器任务之最。天宫二号开展了大规模的科研项目，并达到很高的国际水平，例如空间冷原子钟实验抢占了国际相关研究制高点，将对卫星定位导航等生产生活及引力波探测等空间科学研究产生重大影响。

二、天宫二号开展的重点科研项目及其国际水平

(一) 基础物理领域开展空间冷原子钟和空地量子密钥分配实验研究，在国际上率先实现突破

1. 空间冷原子钟实验

空间冷原子钟的工作原理是利用激光冷却和俘获技术获得接近绝对零度的超冷原子团，并将其沿轴向抛射入微波腔。在空间微重力条件下，原子团没有地面重力引起的自由下落，可以做超慢速匀速直线运动，因此在微波腔内与微波的相互作用时间大大延长。在原子团与微波作用后利用原子能级探测可获取原子钟谱线 Ramsey 条纹，该谱线反馈到本地振荡器即可获得高精度时间频率信号。目前，天宫二号空间冷原子钟在轨实验正在顺利开展，已获得原子抛射速度分别为 4 米/秒、2 米/秒和 1 米/秒的 Ramsey 信号，其对应的日稳定度为 1.7×10^{-15} 。通过系统参数的优化，预计可实现 8×10^{-16} 的预定目标。

由于高精度空间原子钟在计量学、授时、全球导航定位系统、

基础物理等方面都有非常重大的科学研究和工程应用价值，国际上争相开展空间高精度原子钟的研究计划。我国天宫二号上的空间冷原子钟是国际上第一台空间运行的冷原子钟，抢占了国际上空间时频基准研究的制高点。而且，其频率稳定度达到 10^{-16} 量级(即误差小于 1 秒/3 千万年)的国际先进水平，可以使我国自主授时和导航精度提高 1~2 个数量级，在国防、高精度星钟等方面具有重要应用价值和潜在效益。由欧洲航天局支持的 ACES 计划，原计划于 2017 年发射，现已推迟至 2018 年，而另外两个计划 PARCS 和 RACE 已被放弃。

2. 空地量子密钥分配

密钥的作用就是用来对传输的信息进行加密，防止他人获取信息内容。量子密钥传输是利用单光子量子态作为信息的载体，经由量子通道传送，加上必要的经典通信，在用户之间建立起共享的随机数密钥。量子密钥传输的最大特点是绝对的安全性。天宫二号上的量子密钥分配试验采用 Decoy 方法，对光量子进行偏振态调制生成密钥，通过天地双向高精度动态跟瞄，进行天地间超远距离的量子密钥传输。同时开展空地激光通信实验，速率为 1.6 吉比特/秒。空间捕获、跟踪与瞄准动态跟瞄精度优于 10 微弧度，有效密钥速率约 3 千比特/秒。目前，在轨测试已验证了双向跟瞄系统的性能，成功实现捕获跟瞄，且信标光、量子光和同步光均输出正常，后续将开展量子密钥传输试验。

天宫二号上的量子密钥分配试验突破并验证了量子密钥生成、分配、提取、光信道保持等重大关键技术，保持了我国在先进量子调控科学技术领域的领先地位；同时为未来建立绝对安全的国家量子保密通信网络、推进量子密钥分配技术实用化奠定了基础。

(二) 空间天文领域开展伽马暴偏振探测，测量能力处于国际领先水平

自 20 世纪 60 年代以来，科学家已对伽马暴进行了长期的观测研究，但其成因和机理尚没有定论。宇宙伽马射线的偏振信息对研究辐射源性质和辐射机制有重要作用，但难以测量。中国与瑞士合作开展伽马暴偏振探测，采用康普顿散射测量原理，通过 γ 光子康普顿散射产生的反冲电子径迹方向来反演 γ 射线的入射角和偏振度。该实验通过这种方法可对宇宙伽马暴和太阳耀斑高能辐射进行高灵敏度的偏振观测，从而揭示伽马暴的本质和太阳高能活动的规律。该实验采用 25 套探测器单体，每套由 8×8 阵列的塑料闪烁体棒组成，共形成 40×40 的探测阵列，即 1600 个探测通道，其探测能区为 50 ~ 500 keV。目前经过在轨测试 1600 个通道均可正常探测，康普顿散射谱符合预期，并发现了太阳暴候选体和蟹状星云脉冲星信号，后续观测将有望获得有重大影响的科学新发现。

伽马暴瞬时辐射偏振的研究具有非常重要的意义，但是由于仪器能力的限制，目前世界上还没有对伽马暴偏振的有效测量结果。天宫二号上的伽马暴偏振仪 POLAR 对伽马暴偏振的测量能力比国际上其他现有仪器强 10 倍以上，能够在国际上首次实现对伽马暴偏振的有效测量，将开辟空间天文观测的新窗口，预期将取得突破性的进展。

(三) 微重力科学领域开展液桥热毛细对流和综合材料实验研究，追赶国际先进水平

1. 液桥热毛细对流研究

该项目研究在微重力环境下，不同形状比(高径比范围 0.5 ~ 1.1)和体积比(0.65 ~ 1.1)的大 Prandtl 数(高粘性、低热传导)液桥热毛细对流的不稳定性，包括转捩、二次转捩和温度振荡等。

液桥实验模型来自地面采用的单晶拉制技术通过数值模拟、空间与地面实验对比，有望搞清机理，并有助于为地面浮区法晶体材料生长提供科学指导，以改进地面晶体材料生产。实验采用的液桥直径为 20 毫米，实验装置具有注液建桥、形状比和体积比控制、温度和形貌测量以及断桥再建等功能。该项目在神舟十一号飞船返回后开始进行正式实验，空间应用系统为该项目研发了遥科学实验平台，可在地面对实验进行实时操作和监测。

在微重力条件下液桥研究方面，意大利微重力中心从 20 世纪 90 年代就开始了半浮区液桥问题的地面数值模拟和空间遥科学实验，得到了较大尺寸(20 毫米直径)空间液桥的尺度比和临界振荡参数的关系，发现控制加热速率十分重要，大尺寸液桥的临界数较高。90 年代以来，日本进行了大 Prandtl 数、小 Prandtl 数流体液桥的数值模拟和地面实验，研究的问题多集中在液桥临界几何参数的确定及从定常到湍流的转换，并在国际空间站上开展了液桥高径比和体积效应的实验研究。天宫二号上液桥热毛细对流实验中，我国科学家在大 Prandtl 数二次转换等科学问题方面具有原创科学思想。实验上采用的液桥直径为 20 毫米，在国际上属于较大的尺寸。

2. 综合材料实验研究

综合材料实验研究研制了新型双温区电阻加热多工位炉，温度范围为 500 ~ 950℃，温度梯度为 6 ~ 45℃/毫米，温度稳定度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。实验安排了 3 批样品，每批 6 支，开展半导体材料、光电子材料、金属合金和亚稳材料、新型功能晶体、纳米和复合材料等多种材料加工实验。航天员负责在轨更换样品，目前两批样品已完成实验，航天员已将这两批样品带回地面由科学家们进行深入分析。

国际空间站上的材料研究实验已经开展了 40 余项，在新材料制备研究、凝固过程及机理研究、材料暴露实验等方面取得显著

成果。近几年，国际空间站部署了多项实验进行微重力环境下材料热物理性质的研究。天宫二号上的综合材料实验装置的大部分实验样品均为国际上首次实验，如新型纳米复合光学材料、高性能热电转换材料、多元复相合金材料等，包括了材料的生长和热物性测量两种类型的研究。另外，天宫二号上的综合材料装置与国际上同类用途的装置相比有三大优势：(1)低功耗与高温，功率仅为 200 瓦，但最高加热温度可达 950℃；(2)材料实验炉重量轻(重量小于 22 千克)、尺寸小、但可生长的样品尺寸大；(3)实验装置的适应性更强，既适合无人飞行时进行较高温度下的材料科学实验，也可在有人状态由航天员参与更换样品，从而进行更多样品的实验。

(四) 空间生命科学领域高等植物培养取得突破性进展，但与国际领先水平尚有差距

高等植物培养实验研究微重力条件下高等植物从种子到种子的生长发育规律，探索微重力条件下长日照与短日照植物的光周期诱导开花规律、调控机理和基因表达变化等。实验采用长日照植物拟南芥和短日照植物水稻作为样品，专门研制了植物培养箱，其温度范围为 17 ~ 28℃，湿度范围 60% ~ 100%，光照强度和周期可调。植物生长中最显著的变化是从植株到开花的过程，其受到环境和内部传导信号的影响，在微重力和节律变化复合环境下开展实验对搞清机理是新的探索。目前已在轨完成了植物培养实验，生长状况良好，开花基因在长日照培养条件下能够启动表达，并且在叶片中积累。航天员已回收样品并带回地面。

空间植物栽培技术试验研究迄今已有 40 余年的发展历程，已进行了多种单子叶和双子叶植物的空间栽培试验。例如，苏联从 1975 年就开始在其飞船中栽培小麦、洋葱、燕麦、豌豆、甘蓝、萝卜和生菜等，以探索实施太空农业的可能性。美国利用先进的空间培养装置实现了空间植物的多代连续培养。近期，国际空间

站上的多国航天员已经吃上自己亲手种植的紫叶生菜，这在空间植物栽培技术的发展史上具有里程碑意义。

我国早在 1987 年就开始了空间植物学研究。但由于缺少长期在轨实验机会与条件，我国之前在空间进行的都是短期植物培养实验，还没有进行过从种子到种子的长期空间植物培养实验。本次天官二号中的实验选择了长日照植物拟南芥和短日照植物水稻为研究样品，同时构建了绿色荧光标记开花基因的转基因植株，将通过实时的可见光和荧光图像技术观察微重力条件下拟南芥和水稻从种子萌发、幼苗生长到开花发育的全过程，为解析微重力条件下高等植物形态建成，以及从种子萌发、营养生长向生殖生长转变过程的调控机理提供新的知识，对植物栽培和品种选育等都有重要意义。

(五) 地球科学观测及应用载荷包括多角度宽波段成像仪、三维成像微波高度计和多波段紫外临边成像光谱仪，载荷研制技术达到国际先进水平

天官二号上搭载的 3 台新一代对地观测遥感器和地球科学研究仪器，技术体制新，技术指标先进，其研制技术已达到国际先进水平。

1. 多角度宽波段成像仪

多角度宽波段成像仪是新一代空间光谱成像遥感器，是国际上第一台集成了近红外高光谱成像、短波红外、热红外多光谱成像，同时兼具偏振探测功能的成像仪。其中多角度偏振成像仪可有效探测卷云，获取云顶高度、气溶胶和大气水含量等信息，其空间分辨率 3 千米，刈幅 770 千米，偏振测量精度 2%；宽波段成像光谱仪可获取海洋、大气、陆地的精细光谱信息，光谱范围 0.4~10 微米，光谱分辨率 5~10 纳米，刈幅 300 千米。多角度宽波段成像仪已在轨开展观测研究，获取了一批陆地、海洋和大气的高质量数据，后续将持续观测并开展与全球变化相关的地球环

境研究，并持续拓展在环境、海洋、农业、林业中的广泛应用。

2. 三维成像微波高度计

三维成像微波高度计可获取海浪、潮汐潮流等海洋动力环境要素、二维海/陆图像和三维海/陆地形，在全球气候与环境变化监测、海洋动力学环境研究等方面将提供重要数据，并可为海洋活动提供保障。该仪器实现宽刈幅 30 千米，分辨率 100 米，海洋相对测高精度 10 厘米，预计反演的海面风速精度优于 ± 2 米/秒，风向精度优于 15° 。该高度计目前已获得了三维海面形态图像和良好的三维海陆交界形态图像等高质量数据。

三维成像微波高度计是国际上首个采用融合合成孔径、短基线干涉测量和新型高度跟踪等先进微波遥感体制于一体的新型雷达高度计，是国际上第一个实现宽刈幅海平面高度测量的星载雷达高度计，第三个星载双天线干涉雷达系统。它的成功在轨运行，是我国星载微波遥感技术的一次重大突破，可为我国新一代的海洋动力环境观测卫星提供达到国际先进水平的微波载荷。相比于传统海洋高度计的观测刈幅仅为几千米，天宫二号微波高度计的观测刈幅达到数十千米，观测效率和性能得到了极大的提升，进而可提高对海洋环境的监测效率和对海洋灾害预报的能力。

3. 多波段紫外临边成像光谱仪

多波段紫外临边成像光谱仪可获取全球大气密度、臭氧分布和气溶胶等微量成分的垂直结构及三维动态分布，研究大气各层相互作用及与地球各圈层以及与太阳活动、空间环境的关系。其工作模式是从近地空间对准地球边缘，观测地球大气的紫外及更宽波段的光谱。该仪器包括一台环形成像光谱仪， 360° 环形全方位观测，三通道中心波长 265 纳米、295 纳米、360 纳米，具有 20 ~ 40 纳米的窄带观测能力，像元分辨率 4 千米；另有一台前向成像光谱仪，波长范围 280 ~ 1000 千米，光谱分辨率 1.4 纳米，像元分辨率 3 千米。

该成像仪是国际上首次采用大视场对全球中层大气进行紫外环形、前向临边辐射特性的准同时探测，突破和验证了紫外临边成像光谱探测关键技术，实现了垂直对地的天底探测和对地球切线方向的临边多方位探测组合及反演比对，实现了对地球大气多方位、高光谱、多时空分辨率观测，将为地球大气环境探测和空间物理研究方面提供新的信息源，达到比一般临边探测更高水平的层析反演，这在国际上是首创。

(六) 空间应用新技术领域开展伴随卫星试验，为未来空间站及新型航天任务奠定基础

伴随卫星试验即在轨释放小卫星并驻留伴随飞行。天宫二号上的伴飞小卫星此次的主要任务是在天宫二号和神舟十一号组合体期间飞越观测载人航天器，获得有价值的图像，并将开展微机电系统惯性测量组件、微型通用星载计算机等新技术试验。伴随卫星已在太空成功释放，并对组合体进行了伴飞与拍摄。

纵观国外载人空间站、飞船、伴随类卫星的任务，在目标飞行器上开展伴随卫星的试验具有两方面的重要应用：可以为大型航天器提供安全监测和维护；可以为大型航天器提供功能的拓展和延伸。美、日、德等航天大国在载人航天飞行器上开展卫星的释放、回收或伴随飞行试验的技术已经非常成熟。例如，国际空间站在 2014 年 1 月至 3 月期间就部署了 33 颗立方星。这说明在载人航天活动中开展此类任务具有难以替代的优越性和重要的应用价值。天宫二号上的伴星释放试验进一步验证了小卫星在轨释放、驻留伴随飞行等技术，为未来新型航天器编队飞行及小卫星的应用奠定了技术基础。

(七) 空间环境分系统载荷研制技术达到国际先进水平

天宫二号上的空间环境分系统由带电粒子辐射探测器、轨道大气环境探测器和空间环境控制单元共 3 台仪器组成，具备监测

目标飞行器舱外多个方向的电子、质子等粒子的强度和能谱，轨道大气密度、成分、微质量及其时空变化，原子氧及其他空间环境污染效应等多项功能。

空间环境分系统的定位是以载人航天工程空间环境保障为主，兼顾空间物理研究。其任务目标为：监测高能带电粒子辐射、轨道大气环境及其效应，为空间环境预报、空间环境变化机理研究以及目标飞行器、飞船和航天员的安全保障提供准实时监测数据；突破多传感器综合探测技术，进一步提高我国空间环境探测技术水平。在圆满完成空间环境保障基础上，在空间物理研究方面进一步取得收获，主要包括：获得400千米高度上辐射环境方向分布的全球覆盖数据、轨道大气综合参数数据，支撑自主建模；有望在可能的空间环境事件中，捕捉到有科学意义的新发现，支撑空间物理研究。

天宫一号首次突破小型化16向粒子探测技术，首次突破大气成分、密度传感器融合技术和微质量测量技术，在国际上处于先进水平。天宫二号基本上继承了天宫一号的全部指标，但依据具体任务进行了7项适用性更改以满足天宫二号的任務要求。由于天宫一号空间环境设计的前瞻性和国际上系列卫星更新换代过程中对数据一致性的考虑，目前天宫二号的空间环境分系统仍处于国际先进水平。

例如，在辐射环境探测方面，与美国的GOES能量粒子探测器相比，天宫二号带电粒子辐射探测器的探测方向为16个，优于GOES的3个探测方向，并且其探测角分辨率也明显优于GOES。此外，天宫二号辐射环境探测器采用16个传感器一体化结构，仪器的重量、功耗(2.8千克，4.5瓦)远远低于国外。但GOES能量粒子探测器也具备相比我们的优势，例如其可探测的粒子种类更多。

轨道大气探测方面，目前国际上尚无将大气密度、大气成分、

微质量集成的综合探测器，因此天宫一号/天宫二号轨道大气环境探测器这种集成的综合探测器在国际上也属于先进水平，与国际空间站和彗星四极质谱仪、Cassini 等卫星的大气探测载荷相比，天宫轨道大气环境探测器集成度更高、探测内容更丰富，在实现相同功能性能的前提下，具有较小的功耗、质量和体积。

三、对中国空间站后续空间应用发展的思考与建议

(一) 提前布局预先研究，推动空间应用任务实施

空间站时期将实施更多更大规模的空间应用任务，提前布局对空间应用任务的顺利实施非常关键。我国计划在 2022 年前后完成空间站的建设和运营，在轨运营达 10 年以上，建成后将实现长期有人照料，在空间站上可滚动开展大规模、多学科的数百项科学研究任务。对于这些科学与应用任务，开展充分的地面预先研究对提高空间科学实验的成功率，从而提升空间站资源的利用效率非常关键。提前布局空间应用任务的地面实验平台，为空间科学与应用任务的预先研究提供必要的实验条件，做好项目的前期培育是促进重大研究成果产出的重要途径。

(二) 强化数据利用和产出

我国空间载荷研制技术已经位居世界前列，得到众多高质量空间实验数据或观测数据，需要进一步提高数据的共享和利用率，增强数据的分析和应用产出。我国空间站安排了大型光学设施、暗物质探测设施、中子星极端天体物理和新体制地球观测仪等研究设施，将获取海量的天文观测和对地观测数据，这些数据如果仅限于有限的用户，则海量数据资源无法得到充分挖掘，数据的应用效益得不到充分发挥。因此，必须加强科学与应用数据的处理、管理、共享和利用，显著提高数据的利用率，从而促进重大研究成果源源不断地产出。

(三) 保障科学研究系统性和连续性

我国空间站时期的空间科学研究需要具有更强的系统性和连续性。国际空间站中，针对某些学科领域重要的科学问题，通常会设计开展一系列连续的科学实验，力图把科学研究做深做透，这是获取重大研究成果的必要途径。例如，在材料科学方面，为了研究在空间微重力环境下气泡移动的本质规律，NASA 先后设计开展了 17 次实验，获取了无对流效应下气泡移动的基础数据，对微重力环境下气泡行为模型及其对材料微结构影响的理论进行了发展。我国空间站建成之后，针对研究空间特殊环境下本质规律的科学研究项目有必要设计与开展连续的系列实验，获取大批高质量科学数据，通过系统深入的分析研究和反复验证，将有望产生更多、更有价值的研究成果。

(中国科学院空间应用工程与技术中心 中国科学院
院科技战略咨询研究院)